
7 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Optimierung einer Filterbank zur Teilbandcodierung von HDTV-Signalen bei gleichzeitiger Ausnutzung der möglichen Redundanz- und Irrelevanzreduktion. Diese Optimierung betraf sowohl die Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter als auch die Struktur der Filterbank. Sie beschränkt sich auf Filterbänke mit der Möglichkeit zur exakten Rekonstruktion.

Die Arbeit geht von einer bewegungskompensierenden Teilbandcodierung aus, die in regelmäßigen zeitlichen Abständen die Bewegungskompensation abschaltet. Bei der Optimierung der Filterbank wurden deshalb zwei Eingangssignale betrachtet, entweder die Luminanzkomponente des HDTV-Originalsignals oder das daraus gewonnene Fehlersignal der bewegungskompensierenden Prädiktion.

In die Optimierung geht das Quellenmodell zur Beschreibung des Eingangssignals und das Empfängermodell zur Beschreibung der visuellen Wahrnehmungseigenschaften des menschlichen Auges ein. Als Quellenmodell wurde die spektrale Leistungsdichte des jeweiligen Eingangssignals verwendet. Das verwendete Empfängermodell berücksichtigt die MTF des menschlichen Auges. Aus dem Empfängermodell ergibt sich die Sichtbarkeitsschwelle und damit die Grenze des zulässigen Quantisierungsrauschens. Für das Eingangssignal wurden HDTV-Signale mit einer horizontalen Abtastfrequenz von 54 MHz betrachtet.

Mithilfe des gegebenen Quellen- und Empfängermodells wurde der aus der Rate-Distortion-Theorie bekannte theoretische untere Grenzwert der Datenrate berechnet. Dieser gilt für Systeme der Teilbandcodierung, bei denen eine hinreichend hohe Anzahl von Teilbandsignalen und Filterkoeffizienten vorgegeben wurde. Er liegt bei der verwendeten Luminanzkomponente der besonders kritischen und deshalb in dieser Arbeit verwendeten Testsequenz "BERT" für die Prädiktionsfehlersignale bei 1.11 bit/pel und für die Originalsignale bei 2.30 bit/pel.

Desgleichen wurde der theoretische untere Grenzwert der Datenrate bei vorgegebener begrenzter Teilbandanzahl der Filterbank ermittelt. Bei dieser Berechnung wurde die Anzahl der Teilbandsignale begrenzt und angenommen, daß die Abtastwerte der Teilbandsignale statistisch unabhängig sind. Es wurde gezeigt, daß dieser theoretische untere Grenzwert der Datenrate mit einer Filterbank aus Bandpässen mit unendlich schmalen Übergangsbereichen erreicht wird, deren Übertragungsfunktionen im Durchlaßbereich im Falle der Analysefilterbank proportional und im Falle der Synthesefilterbank reziprok proportional zur MTF sind. Bei angepaßter Quantisierung der Teilbandsignale stimmt dann das Spektrum des Codierfehlers exakt mit der Sichtbarkeitsschwelle

überein. Durch eine Einschränkung auf beispielsweise 64 Teilbandsignale gleichförmiger Bandaufteilung erhöht sich die Datenrate von 1.11 bit/pel auf 1.19 bit/pel bzw. von 2.30 bit/pel auf 2.34 bit/pel.

Der theoretische untere Grenzwert der Datenrate bei vorgegebener Bandaufteilung mit begrenzter Teilbandanzahl wurde nicht nur für beliebige Systeme, sondern auch für die Einschränkung auf orthogonale Systeme hergeleitet. In diesem Grenzfall werden ideale Bandpaßfilter angenommen, da die Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter im Durchlaßbereich wegen der Orthogonalität des Systems erzwungenermaßen konstant sind; die MTF kann nur über teilbandindividuelles Quantisierungsrauschen ausgenutzt werden. Hier liegt der Codierfehler teilweise unterhalb der Sichtbarkeitsschwelle, so daß der theoretische untere Grenzwert der Datenrate in diesem Fall oberhalb des Grenzwerts bei vorgegebener Bandaufteilung mit begrenzter Teilbandanzahl für beliebige Systeme liegt. Die Einschränkung auf 64 Teilbandsignale bei gleichförmiger Bandaufteilung erhöht die Datenrate hier von 1.11 bit/pel auf 1.39 bit/pel bzw. von 2.30 bit/pel auf 2.52 bit/pel. Wegen der großen Verluste an Codierungseffizienz durch die Einschränkung auf orthogonale Systeme wurden diese Systeme nicht weiter verfolgt. Dieser Grenzwert wird lediglich für spätere Vergleiche herangezogen.

Für die in der vorliegenden Arbeit durchgeführte Optimierung der Filterbank wurde eine zweischrittige Strategie verfolgt. Im ersten Schritt der Optimierung wurde die Lösungsmenge infragekommender Filterbankstrukturen durch eine Abschätzung eingeschränkt. Es wurden nur Bandaufteilungen berücksichtigt, die sich durch wiederholte Anwendung einer zweidimensionalen Zweibandaufteilung darstellen lassen. Damit lassen sich Bandaufteilungen mit $N = (3i + 1)$ Teilbandsignalen realisieren. Für $N = 4 \dots 64$ wurde jeweils durch Berechnung des theoretischen unteren Grenzwerts der Datenrate diejenige Bandaufteilung bestimmt, mit der die Datenrate minimal wird. Dabei ist die Anzahl der Filterkoeffizienten noch beliebig. Die so ermittelten Bandaufteilungen werden im folgenden als optimierte Bandaufteilungen bezeichnet und sind in der Regel ungleichförmig. Mit steigender Anzahl der Teilbandsignale sinkt der theoretische untere Grenzwert der Datenrate solcher Bandaufteilungen und nähert sich dem theoretischen unteren Grenzwert der Datenrate von Bandaufteilungen mit hinreichend hoher Teilbandanzahl.

Die Ergebnisse dieses ersten Schrittes der Optimierung zeigen, daß bis zu einer Anzahl von 16 Teilbandsignalen jede weitere Bandaufteilung den theoretischen unteren Grenzwert der Datenrate deutlich reduziert. Auch für $N > 16$ verringert sich dieser Grenzwert der Datenrate der optimierten Bandaufteilung noch geringfügig. Er beträgt bei 64 Teilbandsignalen für die Prädiktionsfehlersignale 1.18 bit/pel und für die Ori-

nalsignale 2.32 bit/pel. Er liegt damit lediglich um 0.07 bit/pel für Prädiktionsfehlersignale und um 0.02 bit/pel für Originalsignale über dem oben erwähnten unteren Grenzwert der Datenrate bei hinreichend hoher Teilbandanzahl. Deshalb wurde in diesem Schritt der Optimierung keine Untersuchung für $N > 64$ durchgeführt.

Der theoretische untere Grenzwert der Datenrate für die optimierte Bandaufteilung mit 13 Teilbandsignalen liegt bei 1.21 bit/pel bzw. bei 2.46 bit/pel. Die in der Bildcodierung häufig eingesetzte ebenfalls ungleichförmige Wavelet-Struktur mit 13 Teilbandsignalen weist demgegenüber einen um 0.04 bit/pel bzw. um 0.28 bit/pel höheren Grenzwert der Datenrate auf. Die ungleichförmige Wavelet-Struktur ist demzufolge der in dieser Arbeit bestimmten ungleichförmigen optimierten Bandaufteilung deutlich unterlegen.

In dem hier betrachteten Bereich $N = 4 \dots 64$ existieren nur für $N = 4, 16, 64$ gleichförmige Bandaufteilungen. Bei $N = 4$ liegt stets eine gleichförmige Bandaufteilung vor, die mit 1.50 bit/pel bzw. 3.04 bit/pel recht hohe Datenraten benötigt und daher nicht weiter verfolgt wird. Für $N = 16$ liegt der theoretische untere Grenzwert der Datenrate für die gleichförmige Bandaufteilung bei 1.22 bit/pel bzw. bei 2.46 bit/pel. Bei $N = 64$ beträgt diese Datenrate für die gleichförmige Bandaufteilung wie oben erwähnt 1.19 bit/pel bzw. 2.34 bit/pel. Die Datenrate der optimierten ungleichförmigen Bandaufteilung liegt bei $N = 16$ um 0.01 bit/pel bzw. um 0.03 bit/pel und bei $N = 64$ um 0.01 bit/pel bzw. um 0.02 bit/pel unter der Datenrate der gleichförmigen Bandaufteilung.

Die Untersuchungsergebnisse des ersten Schrittes der Optimierung ergeben also, daß der theoretische untere Grenzwert der Datenrate von ungleichförmigen Bandaufteilungen um weniger als 1% unter der Datenrate der gleichförmigen Bandaufteilungen liegt. Aufgrund dieses geringen Unterschiedes werden bei der Optimierung der Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter nur die gleichförmigen Bandaufteilungen in Betracht gezogen, da sie bei gleicher Impulsantwortlänge L über eine größere Anzahl von Freiheitsgraden bzgl. der Übertragungsfunktionen verfügen als die kaskadiert realisierten ungleichförmigen Bandaufteilungen. In der so eingeschränkten Lösungsmenge verbleiben folglich die einstufig realisierten gleichförmigen Bandaufteilungen mit 16 oder mehr Teilbandsignalen.

Die im ersten Schritt der Optimierung ermittelten theoretischen unteren Grenzwerte der Datenraten von vorgegebenen Bandaufteilungen mit begrenzter Teilbandanzahl und beliebig kleinem Übergangsbereich in den Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter sind mit einer begrenzten Anzahl von Filterkoeffizienten nicht zu erreichen. Für die Strukturen der eingeschränkten Lösungsmenge wurden daher im zweiten Schritt der

Optimierung die Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter zusammen mit der Quantisierung der Teilbandsignale bezüglich Redundanz- und Irrelevanzreduktion optimiert, wobei die Optimierung der Übertragungsfunktionen auf linearphasige Teilbandfilter beschränkt wurde. Der untersuchte Bereich der Anzahl der Filterkoeffizienten wurde wegen der Anwendung in der HDTV-Bildcodierung aus Aufwandsgründen auf maximal 32 Filterkoeffizienten beschränkt. Als Folge dieser begrenzten Koeffizientenanzahl vergrößert sich der Übergangsbereich in den Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter. Das damit verbundene Aliasing vermindert die Redundanzreduktion. Dieser Effekt wird mit steigender Anzahl von Teilbandsignalen immer ausgeprägter, so daß die erforderliche Datenrate mit wachsender Anzahl von Teilbandsignalen wieder ansteigen kann. Das Minimum der Datenrate liegt dann bei einer begrenzten Anzahl von Teilbandsignalen vor. Um dieses Minimum zu ermitteln, wurden im zweiten Schritt der Optimierung die gleichförmigen Bandaufteilungen mit 16, 64 und 256 Teilbandsignalen betrachtet. Für diese einstufigen Realisierungen mit gleichförmiger Bandaufteilung wurden Teilbandfilter sowohl für Prädiktionsfehlersignale als auch für Originalsignale optimiert. Als Gütekriterium der Optimierung wurde die Datenrate der unabhängig codierten Teilbandsignale verwendet.

Bei den untersuchten Systemen verringert sich die Datenrate erwartungsgemäß mit steigender Anzahl der Filterkoeffizienten. Dieser Effekt läßt sich besonders bei wenigen Filterkoeffizienten erkennen. Sowohl bei den Prädiktionsfehlersignalen als auch bei den Originalsignalen wird die minimale Datenrate mit 64 Teilbandsignalen und 32 Filterkoeffizienten erreicht, gefolgt von den Filterbänken mit 64 Teilbandsignalen und 16 Filterkoeffizienten. Da bei diesen Systemen die Differenz in der Datenrate weniger als 0.01 bit/pel beträgt, erweist sich aus Aufwandsgründen das jeweilige System mit 64 Teilbandsignalen und 16 Filterkoeffizienten als die günstigste Lösung für beide Eingangssignaltypen.

Die im Zuge der Optimierung berechneten Datenraten beruhen auf einer Reihe von Modellannahmen. Um zu überprüfen, inwieweit diese Datenraten bei der Realisierung einer Teilbandcodierung erreichbar sind, wurden die optimierten Systeme mit 16 Filterkoeffizienten je Teilband und 16, 64 bzw. 256 Teilbandsignalen sowie die mit 64 Teilbandsignalen und 8 bzw. 32 Filterkoeffizienten in einer Simulation nachgebildet und die Datenrate der quantisierten und codierten Teilbandsignale gemessen. In jedem Teilbandsignal wurde ein gleichförmiger Quantisierer angewendet, dessen Stufenbreite aus dem zulässigen Quantisierungsfehlerauschen berechnet wurde. Als Entropiecoder wurden in jedem Teilband arithmetische Coder verwendet. Die gemessenen Datenraten wurden durch Mittelung über die gemessenen Datenraten der Testsequenzen "BERT",

”EDINBURGH” und ”SKI” bestimmt. Entsprechend wurden Datenraten durch Mittelung über berechnete Datenraten der Testsequenzen ”BERT”, ”EDINBURGH” und ”SKI” berechnet und zur Bewertung der Optimierungsergebnisse herangezogen.

Es zeigte sich, daß auch in der Simulation sowohl für Prädiktionsfehlersignale als auch für Originalsignale die einstufige Realisierung mit gleichförmiger Bandaufteilung in 64 Teilbandsignale als das jeweils optimale System ermittelt wird. Somit stimmen Optimierungs- und Meßergebnisse qualitativ überein. Bei der optimierten Filterbank mit minimaler Datenrate beträgt die betragsmäßige Abweichung zwischen den berechneten und gemessenen Datenraten sowohl bei den Prädiktionsfehlersignalen als auch bei den Originalsignalen 0.02 bit/pel. Damit liegen die gemessenen Datenraten um weniger als 2% über bzw. weniger als 1% unter den berechneten. Diese Abweichungen werden durch Verletzung der in dieser Arbeit eingeführten Modelle verursacht.

Zur Bewertung des Optimierungsergebnisses wurden die berechneten Datenraten der beiden optimierten Systeme mit den oben beschriebenen theoretischen unteren Grenzwerten der Datenrate verglichen. Dabei wurde ebenfalls über berechnete Datenraten der Testsequenzen ”BERT”, ”EDINBURGH” und ”SKI” gemittelt, um verschiedene HDTV-Testsequenzen mit unterschiedlichen Eigenschaften zu untersuchen. Durch die Einschränkung auf die begrenzte Teilbandanzahl von 64 erhöht sich die Datenrate um 0.04 bit/pel auf 1.42 bit/pel bzw. um 0.04 bit/pel auf 2.05 bit/pel. Die weitere Einschränkung auf 16 Filterkoeffizienten erhöht die Datenrate um 0.10 bit/pel auf 1.52 bit/pel bzw. 0.15 bit/pel auf 2.20 bit/pel. Die Einschränkung der Anzahl der Filterkoeffizienten vermindert die Datenreduktion also wesentlich stärker als die Einschränkung der Teilbandanzahl. Dennoch liegt die Datenrate der optimierten Systeme um 0.11 bit/pel bzw. um 0.02 bit/pel *unterhalb* des theoretischen unteren Grenzwerts der Datenrate für *orthogonale* Systeme gleicher Teilbandanzahl, die nur mit idealen Bandpässen zu erreichen ist. Ein Vergleich der Datenrate einer 8*8 DCT mit der berechneten Datenrate der optimalen Systeme zeigt, daß die optimalen Systeme eine um 0.13 bit/pel bzw. 0.31 bit/pel höhere Datenreduktion erreichen.

Um abzuschätzen, welche zusätzliche Datenreduktion die Anwendung der optimierten Teilbandcodierung anstelle einer DCT in einer Hybrid-Codierung erzielt, wurden die mit den optimierten Filterbänken erzielbaren Datenraten der Teilbandcodierung abschließend mit den Datenraten der Luminanzkomponente einer DCT-Codierung verglichen. Als Eingangssequenz wurde eine Folge von Original- und vorwärts- bzw. bidirektional prädierten Fehlersignalen gemäß MPEG2 TM6 aus der Testsequenz ”BERT” verwendet. Beide Systeme waren so eingestellt, daß der jeweilige Codierfehler die Sichtbarkeitsschwelle nicht überschreitet. Bei der Teilbandcodierung werden die

Intra-Bilder mit dem für Originalsignale optimalen System und die vorwärts und bidirektional prädizierten Bilder mit dem für Prädiktionsfehlersignale optimalen System, jeweils mit 64 Teilbandsignalen und 16 Filterkoeffizienten, codiert. Die gemessene Datenrate dieser Teilbandcodierung beträgt 1.44 bit/pel.

Für den Vergleich wurde die Realisierung eines DCT-Coders dadurch simuliert, daß im Teilbandcoder anstelle der Impulsantworten der Filterbank die Basisfunktionen der 8*8 DCT eingesetzt werden. Bei der DCT-Codierung wurde eine Datenrate von 1.56 bit/pel gemessen. Die Datenrate der DCT-Codierung liegt damit um 8% über der Datenrate der optimierten Teilbandcodierung.

Die optimierten Filterbänke dieser Teilbandcodierung beruhen auf Leistungsdichtespektren als Quellenmodell, die HDTV-Signale modellieren. Das Leistungsdichtespektrum eines TV-Signals unterscheidet sich jedoch nicht wesentlich von dem eines HDTV-Signals und das menschliche Auge als Empfängermodell bleibt prinzipiell unverändert. Daher lassen sich die hier vorgestellten optimierten Filterbänke ebenso bei TV-Signalen anwenden, wenn eine Codierung an oder unterhalb der Sichtbarkeitsschwelle erzielt werden soll.

Für zukünftige Arbeiten zur Teilbandcodierung bietet es sich an, die Teilbandcodierung durch Anpassung der Teilbandfilter an lokale Bildinhalte zu verbessern. Sofern eine Codierung an oder unterhalb der Sichtbarkeitsschwelle aufgrund der geforderten Datenrate nicht eingehalten werden kann, stellen speziell Codierfehler an Luminanzkanten subjektiv besonders störende Artefakte dar. Hier kann durch Ausnutzung bekannter visueller Wahrnehmungseigenschaften, z.B. der Maskierung in der Nachbarschaft von Luminanzsprüngen, der sichtbare Fehler weitestgehend vermieden werden, indem die Länge der Impulsantworten auf die Wahrnehmungseigenschaften in der Nachbarschaft von Luminanzsprüngen abgestimmt wird. Durch Umschaltung der Teilbandfilter ist eine derartige lokale Anpassung an Luminanzsprünge erreichbar. Als Ausgangsbasis können die in dieser Arbeit optimierten Systeme verwendet werden.